TEKNİK NOT — CİHAZ MİMARİSİ (DÜZELTİLMİŞ SÜRÜM)

$TaSe_2/HfO_2$ Süperörgü Çipi: Önerilen Cihaz Mimarisi ve Sayısal T_c Simülasyonu

Asıl hipotez makalesine ek teknik not: "$TaSe_2/HfO_2$ Heteroyapılarında Altlık Fonon Aracılı Katmanlar Arası Kuplaj Yoluyla Geliştirilmiş Süperiletkenlik" (Yünlü, 17 Haziran 2026) için önerilen fiziksel cihaz gerçekleştirimi.

Hazırlayan: Muzaffer Enes Yünlü · Bağımsız Araştırmacı · Lisans: CC BY-NC-SA 4.0

REVİZYON NOTU: Bu sürümde Bölüm 3'teki T_c tablosu bağımsız olarak yeniden hesaplanmış ve düzeltilmiştir. Orijinal tablodaki değerler, aynı formül ve parametrelerle üretildiğinde ~1,3–2,8 kat şişirilmiş çıkmaktaydı (muhtemelen tablo formülden manuel/AI ile üretilmiş, doğrulanarak çalıştırılmamıştı). Aşağıdaki Bölüm 3, düzeltilmiş sayılarla güncellenmiştir; metnin geri kalanı orijinal belgeyle aynıdır.

1. Amaç ve Kapsam

Bu teknik not, orijinal hipotez makalesinde teorik olarak tanımlanan altlık-fonon aracılı katmanlar arası kuplaj mekanizmasını somut bir cihaz mimarisine dönüştürür. Amaç, laboratuvar ortamında sentezlenebilecek bir $TaSe_2/HfO_2$ süperörgüsünün katman dizilimini, kontak geometrisini ve karakterizasyon akışını belirtmektir. Burada sunulan sayısal T_c değerleri, makalenin 3. bölümünde verilen McMillan–Allen-Dynes formülünün doğrudan uygulanmasıyla üretilmiştir ve DFT doğrulaması yapılmamış tahminlerdir.

Bu belge bir fabrikasyon raporu değil, bir tasarım-niyet dokümanıdır (design-intent document): hedef, sentez ve taşınım ölçümü çalışmalarını yönlendirecek somut bir parametre seti ortaya koymaktır.

2. Katman Mimarisi

Önerilen çip, alttan üste doğru altı işlevsel bölgeden oluşan bir düşey yığındır. Aktif süperiletken katman (tek katman 2H-$TaSe_2$), her iki tarafından HfO_2 ile çevrelenerek altlık fonon banyosuna maksimum arayüz teması sağlanır.

Katman	Malzeme	Kalınlık / Not	İşlev
6 — Kapak	HfO_2 (amorf)	~2 nm	Pasivasyon, üst arayüz fonon modu
5 — Ayırıcı	HfO_2	1–2 nm	Katmanlar arası tünelleme bölgesi (Test 2 hedefi)
4 — Aktif (×3 tekrar)	Tek katman 2H-$TaSe_2$	~0,7 nm/katman	Süperiletken kanal, Ising eşleşmesi
3 — Arayüz	HfO_2 (kristal)	~3–5 nm	Yüksek enerjili yüzey optik fonon kaynağı (54–80 meV)
2 — Taban dielektrik	HfO_2	~10 nm	Coulomb perdeleme ($\kappa \approx 25$)
1 — Taşıyıcı altlık	Si / SiO_2	Standart wafer	Mekanik destek, ısıl kararlılık

Tablo 1 — Önerilen süperörgü çipinin katman dizilimi (alttan üste).

Kaynak ve savak kontakları, Ta bazlı metal elektrotlarla aktif $TaSe_2$ katmanlarına yanal olarak bağlanır; bu geometri, taşınım ölçümlerinde düzlem-içi ve düzlem-dışı kritik alanların ($H_{c2}\parallel$, $H_{c2}\perp$) ayrı ayrı ölçülmesine imkân tanır (bkz. Test 3).

3. Sayısal T_c Simülasyonu (Düzeltilmiş)

Cihazın öngörülen geçiş sıcaklığı, orijinal makalede tanıtılan standart McMillan–Allen-Dynes ifadesiyle hesaplanır:

$$\mu^* = \mu / [1 + \mu \cdot \ln(\varepsilon_F / \Omega)] \qquad T_c \approx 1{,}13 \cdot \Omega \cdot \exp[-(1+\lambda) / (\lambda - \mu^*)]$$

Burada Ω, HfO_2 yüzey optik fonon enerjisini (54–80 meV), μ perdelenmemiş Coulomb sözde-potansiyelini (0,12 sabit), ve λ arayüz elektron-fonon kuplaj sabitini ($FeSe/SrTiO_3$ emsaline dayanarak 0,1–0,6 aralığında hipotez edilen) temsil eder. ε_F = 2,0 eV sabit tutulmuştur.

Aşağıdaki tablo, formülün Python ile birebir sayısal olarak çalıştırılmasıyla üretilmiştir (μ=0,12, ε_F=2000 meV sabit):

λ	Ω = 54 meV	Ω = 67 meV	Ω = 80 meV
0,1	~0,00 K	~0,00 K	~0,00 K
0,2	~0,02 K	~0,03 K	~0,03 K
0,3	1,74 K	2,06 K	2,37 K
0,4	8,47 K	10,28 K	12,05 K
0,5	19,28 K	23,61 K	27,87 K
0,6	31,93 K	39,25 K	46,49 K

Tablo 2 — Bağımsız olarak doğrulanmış T_c matrisi. λ=0,1–0,2 aralığı eklendi: bu bölgede λ, μ^*'a (~0,084) çok yakın olduğundan T_c pratik olarak sıfıra yaklaşır — eşleşmenin var olabilmesi için $\lambda > \mu^*$ koşulu kritik hale gelir.

Karşılaştırma: Orijinal Belge vs. Doğrulanmış Hesap

Orijinal teknik nottaki Tablo 2 ile aynı formül ve parametrelerle yeniden hesaplanan değerler arasında sistematik bir şişirme tespit edilmiştir:

λ (Ω=80 meV)	Orijinal belge	Doğrulanmış hesap	Fark
0,3	~7,1 K	2,37 K	×NaN şişirilmiş
0,4	~21,0 K	12,05 K	×NaN şişirilmiş
0,5	~40,7 K	27,87 K	×NaN şişirilmiş
0,6	~62,2 K	46,49 K	×NaN şişirilmiş

Şişirme oranı sabit bir katsayı değildir (düşük λ'da daha büyük, yüksek λ'da daha küçük) — bu, birim dönüşüm hatasından çok, tablonun formülden gerçek hesaplama yapılmadan üretildiğine işaret eder.

Önemli: Kalitatif sonuç değişmemiştir — λ arttıkça T_c üstel olarak artar ve yüksek λ/Ω rejiminde toplu $TaSe_2$ değerinin (~0,2 K) çok üzerinde bir gelişme hâlâ öngörülmektedir (~46,5 K, λ=0,6 ve Ω=80 meV'de). Değişen yalnızca nicel değerlerdir.

4. Sentez ve Karakterizasyon Akışı

Aşağıdaki adımlar, cihazın mevcut ince film büyütme teknikleriyle nasıl gerçekleştirilebileceğine dair bir taslak sunar; bunlar makalenin önerdiği deneysel testlerle doğrudan ilişkilidir.

• Moleküler demet epitaksisi (MBE) veya kimyasal buhar biriktirme (CVD) ile Si/SiO_2 altlık üzerine kristal HfO_2 büyütülür.

• Tek katman 2H-$TaSe_2$, mekanik eksfoliasyon veya doğrudan CVD ile HfO_2 üzerine transfer edilir; arayüz temizliği ARPES ile doğrulanır.

• Atomik katman biriktirme (ALD) ile 1–2 nm kalınlığında HfO_2 ayırıcı katman eklenir; kalınlık, Test 2 için kontrollü bir dizi olarak (0,5–4 nm) taranır.

• Dizilim üç kez tekrarlanarak 3B süperörgü tamamlanır ve amorf HfO_2 kapak katmanıyla pasivasyon yapılır.

• İzotop kontrolü için paralel bir numune setinde ^{16}O yerine ^{18}O kullanılan HfO_2 büyütülür (Test 1).

• Ta bazlı kontaklar litografiyle tanımlanır; düşük sıcaklık taşınım ölçümleri (R–T, $H_{c2}\parallel$ / $H_{c2}\perp$) 4 K altına inen bir kriyostat sisteminde yapılır.

5. Sınırlamalar

Bu simülasyon, McMillan–Allen-Dynes formülünün orta-kuplaj rejiminde ($\lambda < 1{,}5$) geçerli olduğu varsayımına dayanır; güçlü kuplaj rejiminde ($\lambda > 1$) Eliashberg denklemlerinin tam çözümü gerekir ve buradaki tablo o rejimde güvenilir değildir. Ayrıca λ ve Ω değerleri, FeSe/$SrTiO_3$ sisteminden analoji yoluyla tahmin edilmiştir; $TaSe_2$/HfO_2 arayüzü için doğrudan DFPT hesaplaması henüz yapılmamıştır. Sunulan hiçbir sayı, oda sıcaklığı süperiletkenliği iddiası taşımamaktadır.

Ek olarak: bu revizyonda düzeltilen tablo da hâlâ varsayımsal λ ve Ω girdilerine dayanmaktadır — sayısal doğruluk düzeltilmiştir, ancak fiziksel girdi belirsizliği (DFT doğrulaması eksikliği) devam etmektedir.

6. Kaynaklar

1. Bardeen, J., Cooper, L. N., & Schrieffer, J. R. (1957). Theory of Superconductivity. Physical Review, 108(5), 1175.

2. Lee, J. J., ve diğerleri. (2014). Interfacial mode coupling as the origin of the enhancement of T_c in FeSe films on $SrTiO_3$. Nature, 515, 245–248.

3. Li, D., ve diğerleri. (2016). Superconductivity in 2D electron gas induced by high-energy optical phonon mode and large polarization of STO substrate. Physical Review B, 94, 024505.

4. Xi, X., ve diğerleri. (2016). Ising pairing in superconducting $NbSe_2$ atomic layers. Nature Physics, 12, 139–143.

5. Tang, S., ve diğerleri. (2022). High-κ dielectrics for 2D electronics: HfO_2 on transition metal dichalcogenides. ACS Nano, 16(4), 5678.

6. Yünlü, M.E. (2026). $TaSe_2$/HfO_2 Heteroyapılarında Altlık Fonon Aracılı Katmanlar Arası Kuplaj Yoluyla Geliştirilmiş Süperiletkenlik. Bağımsız yayın, CC BY-NC-SA 4.0.